

УДК 621.436.068

*Ю.И. Шеховцов, инж., Л.С. Заиграев, канд. техн. наук*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОКАТАЛИТИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ САЖЕВОГО ФИЛЬТРА ДИЗЕЛЕЙ

### Введение

Сегодня чрезвычайно остро стоит проблема загрязнения окружающей среды вредными и токсичными веществами, выбрасываемые с отработавшими газами (ОГ) двигателей внутреннего сгорания, в частности с дизелями, одним из недостатков которых является увеличенный выброс в окружающую среду твердых частиц (ТЧ).

Современное экологическое законодательство предъявляет высокие требования к выбросам ТЧ с ОГ дизелей: 0,02 г/(кВт·ч) (Еуро IV). Выполнение этих требований возможно с установлением в систему выпуска дизеля сажевого фильтра (СФ). Надежная работа фильтра невозможна без своевременной регенерации его фильтрующего элемента (ФЭ). Это определяет актуальность исследования и развития систем регенерации СФ дизелей [1–3].

### Формулирование проблемы

Регенерация современных СФ дизелей базируется на термokatалитическом выгорании углеродной части ТЧ (сажи), накопленной в ФЭ. Развитие технологий регенерации СФ дизелей направлено на экспериментальное исследование каталитических систем выгорания сажи, и расчетно-теоретическое исследование процесса регенерации ФЭ и влияние на него режимных параметров дизеля [1–3].

Экспериментальные исследования требуют значительных временных и материальных затрат и исследовать таким образом все возможные условия эксплуатации становится не рационально.

Расчетно-модельные исследования позволяют выявить факторы, влияющие на процесс регенерации. Это очень важно для выбора стратегии регене-

рации при заданных условиях эксплуатации дизеля, которая позволяет согласовывать эксплуатационные характеристики СФ и дизеля.

В зависимости режима работы дизеля регенерация может протекать самопроизвольно – авторегенерация: расход и температура ОГ, концентрация кислорода достаточны для выгорания сажи, и принудительно, когда используются методы воздействия на рабочий процесс дизеля или специальные устройства, повышающие температуру газов.

Теоретические исследования крайне мало раскрывают влияние режимных параметров дизеля на выгорания сажи, в частности концентрации кислорода, расхода и температуры ОГ.

Целью работы является расчетно-теоретического исследование термokatалитической регенерации СФ на основе математической модели выгорания сажи в зернистом слое ФЭ, опубликованной в работе [3].

Разработанная математическая модель выгорания сажи в слое ФЭ учитывает явление нестационарного переноса теплоты в ФЭ, химизм и кинетику термического и термokatалитического выгорания накопленной сажи.

### Результаты расчетно-теоретического исследования регенерации

Термическое воспламенение и выгорание сажи в структуре ФЭ происходит за счет остаточного кислорода, содержащегося в ОГ дизельного двигателя, при достижении температуры 550...600 °С. Температурный режим надежной термokatалитической регенерации составляет 300...400 °С. Длительная работа дизеля на режимах частичной нагрузки не способствует выгоранию накопленной сажи в фильтре. Реге-

нерация ФЭ не происходит вследствие низких температур ОГ, однако концентрация кислорода находится на достаточном уровне.

На процесс регенерации СФ влияет не только температура и концентрация кислорода в ОГ. Существенно на выгорание сажи будет оказывать количество ОГ, определяемое режимом работы двигателя или регенеративного устройства. Расход ОГ дизеля, во-первых, непосредственно влияет на мощность, затрачиваемую на прогрев ФЭ газами, в случае принудительной регенерации фильтра. Во вторых, высокая концентрация кислорода в газах не является гарантией надежной регенерации ФЭ фильтра, когда расход газов небольшой.

Принудительная регенерация предполагает организацию благоприятных условий для выгорания сажи в слое СФ и может осуществляться при участии двигателя или без него.

Основной задачей для принудительной регенерации является создание простого регенеративного устройства с минимальной энергоемкостью, согласующейся с мощностью двигателя. На первый план выступают затраты энергии на регенерацию, зависящие от количества прогреваемых газов. Результаты моделирования выгорания сажи в ФЭ в зависимости от расхода воздуха для определенной продолжительности регенерации ( $\tau$ ) и температуры газов ( $T$ ) приведены на рис. 1.

Результаты расчетных исследований представлены для фильтра с ФЭ объемом 5,2 л. ФЭ представляет собой зернистый слой глинозема со средним размером 4,5 мм. Количество сажи распределяется следующим образом, с катализатором взаимодействует 22,5 г, а в слое находится 27,5 г.

В области малых расходов выгорание зависит от количества воздуха, попадающего в ФЭ. С увеличением расхода воздуха растет степень регенерации, достигая максимума. Экстремальность кривых на

рис. 1.а можно объяснить влиянием теплообмена. Рост степени регенерации при малых расходах объясняется ростом температуры слоя и воздуха.

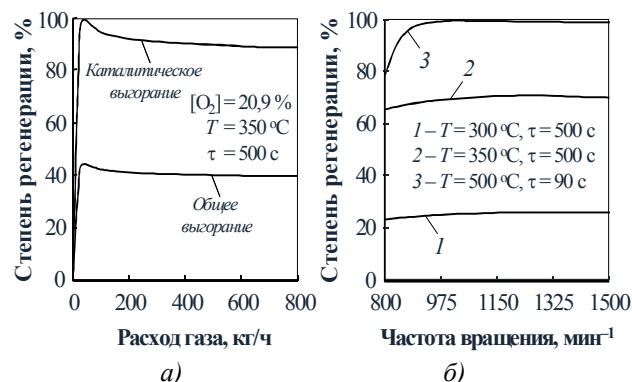


Рис. 1. Влияние расхода газа и концентрации кислорода на степень регенерации:

а – принудительная регенерация вторичным воздухом; б – полнопоточная регенерация в диапазоне режимов работы дизеля 6Ч 12/14

В области больших расходов количество теплоты, выделяемой при сгорании сажи, не приводит к значительному увеличению температуры воздуха и слоя ФЭ, даже при увеличении скорости выгорания за счет достаточности кислорода. Температура слоя приближается к температуре прогретого воздуха, и степень регенерации асимптотически приближается к постоянному значению для данных условий.

Для полнопоточной и авторегенерации значение приобретают характеристики ОГ, зависящие от условий эксплуатации двигателя. На рис. 1.б представлена зависимость степени регенерации от частоты вращения коленчатого вала дизеля 6Ч 12/14.

При температуре ОГ 300 °С степень регенерации во всем диапазоне частот вращения коленчатого вала мала. На этих режимах сажа выгорает на каталитической поверхности, температура ОГ и в слое ФЭ почти не повышается. За 500 секунд выгорает 23...25 % сажи, соприкасающейся с катализатором. Тем не менее, небольшая степень регенерации обеспечивает скорость выгорания сажи намного больше

по сравнению со скоростью накопления ее в слое. Поэтому, в случае довольно частых периодов работы дизеля на таких режимах в течение 5...10 минут, СФ не нужна принудительная регенерация.

При 350 °С сажа интенсивно выгорает на каталитическом покрытии с концентрацией кислорода 9,9...11,4 %. Длительная работа двигателя на таких режимах обеспечит работу фильтра без существенной его загрузки и режим авторегенерации ФЭ. В таком режиме работы СФ не требуются затраты дополнительной мощности для принудительной регенерации, что улучшает экономичность дизеля, оборудованного системой улавливания ТЧ.

На режимах полного нагружения дизеля 6Ч 12/14 температура ОГ может достигать 500 °С, что с запасом перекрывает диапазон каталитического воспламенения сажи для различных катализаторов. Хотя на режимах повышенной нагрузки концентрации кислорода ниже, чем на режимах частичной нагрузки, скорость выгорания очень велика. Высокая скорость выгорания способствует быстрому прогреву слоя ФЭ и ОГ до температур 600...650 °С.

Процесс термokatалитической регенерации СФ на режимах полного нагружения протекает интенсивно: за 90 секунд выгорает 80...99 % сажи на катализаторе. Кратковременные нагрузки на двигатель в течение 2...3 минут позволяют наиболее полно регенерировать ФЭ. Опасным для таких процессов является длительная работа дизеля на режимах частичных нагрузок и холостого хода, приводящая к значительному накоплению сажи в слое, что при регенерации способствует возникновению значительных перепадов температур, разрушению материала ФЭ и изменению свойств катализатора.

### Заключение

Дальнейшие расчетно-теоретические исследования процесса термokatалитической регенерации необходимо направить на оптимизацию условий протекания принудительной регенерации с учетом таких факторов, как концентрация кислорода, расход газов, масса накопленной сажи и теплофизические свойства фильтрующего материала. Такие исследования позволят минимизировать затраты мощности на прогрев ОГ и ФЭ с учетом обеспечения термической стойкости материала фильтра.

Исследования процесса термokatалитической регенерации ФЭ дизельного СФ на базе математической модели выгорания сажи в слое ФЭ с одной стороны раскрывают влияние характеристик дизеля на степень регенерации, с другой – результаты модельных исследований позволяют прогнозировать поведение фильтра в реальных условиях эксплуатации двигателя.

### Список литературы

1. Johnson T. V. Diesel Emission Control in Review // SAE Techn. Pap. Ser. – 2000. – № 2000-01-0184. – P. 23 – 39.
2. Particulate Trap Selection for Retrofitting Vehicle Fleets Based on Representative Exhaust Temperature Profiles / A. Mayer, P. Nothiger, R. Zbinden, R. Evequoz // SAE Techn. Pap. Ser. – 2001. – № 2001-01-0187. – P. 65 – 77.
3. Шеховцов Ю.И., Заиграев Л.С. Математическая модель выгорания твердых частиц в структуре дизельного сажевого фильтра // Авиационно-космическая техника и технология. – 2003. – № 7/42. – С. 16 – 19.